

Caracterización y degradación de los materiales graníticos de la Colegiata de San Isidro, Madrid, España

M. Álvarez de Buergo Ballester, R. Fort González, J. Rodríguez Blanco, M.C. López de Azcona y F. Mingarro Martín

Instituto de Geología Económica (C.S.I.C.-U.C.M.). Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, España.

ABSTRACT

Original granitoids from the façade of the Colegiata de San Isidro are medium-grained-biotitic adamellites, from quarries of the Valdemorillo area (Madrid). The petrophysical properties of the materials allow to establish a clear difference between the two original granites: the most abundant one (A), with a lower porosity, lower water sorption capacity, a lower water vapour permeability coefficient, a higher ultrasonic waves transmission velocity, and a higher strength, respect to the least abundant granite (B). So it can be said the former is more resistant and of better quality than B-granite, or in other words, is a less-alterable granite than B-granite.

In relation to the granites alteration trend, data make possible to establish that A-granite suffers less alteration than B-granite, because in the latter, values of the properties determined in internal and external sections, vary much more than for the A-granite. A brief reference to the conservation state of the main façade and to the monitoring of the atmospheric pollutants registered by two stations close to the building, with the aim of determining its influence on the material degradation, which mainly consists of soiling and blackening.

Key words: granite, alteration, petrophysical properties, crusts, conservation.

INTRODUCCIÓN: ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

La Colegiata de San Isidro el Real, de estilo jesuítico, es el primer monumento barroco realizado en Madrid. Sus fachadas son muy austeras, con una fuerte influencia renacentista herreriana. La fachada principal, de orientación W-NW, es la que está situada a los pies de la iglesia y se abre mediante un pórtico enmarcado por órdenes gigantes de medias columnas en la parte central, y dos cuerpos laterales apilastrados, entre los que existen ventanas y balcones. Sobre dichos cuerpos se elevan las dos torres coronadas con cubiertas de pizarra. Entre las dos torres se encuentra una terraza con cerramiento a la fachada principal en forma de balaustrada.

La construcción del edificio se llevó a cabo desde 1620 a 1664 (P. Sánchez, F. Bautista); las torres se levantaron entre 1673 y 1675. Posteriormente, en 1767, denominándose ya "Colegiata de San Isidro el Real", Ventura Rodríguez realiza modificaciones en las torres y en el pórtico principal. A consecuencia del incendio de 1936, se realizaron importantes obras de restauración en la fachada principal, que abarcaron desde 1943 a 1953 (J. Barroso). A finales de 1999, la Dirección General de Patrimonio de la Comunidad de Madrid ha acometido una primera fase de actuación en la fachada principal (H. Fernández del Castillo).

Prácticamente la totalidad del edificio está realizado en material granítico. En cuanto a su estado de conservación, se aprecia un gran enmugrecimiento de toda la fachada y pérdidas importantes de material como consecuencia de procesos de arenización y fisuración de los granitos. En las partes bajas del pórtico, fundamentalmente, se aprecia la formación de sales y pérdidas por descamación, lo cual debió conducir al relativamente reciente revestimiento mediante aplacado cuyo actual estado (separación del muro por fenómenos de combamiento y alabeamiento) ha favorecido la entrada de agua, y, por tanto, el deterioro del granito. Existen zonas de gran desarrollo de costras negras, sobre todo en los balaustres de la terraza principal.

El objetivo de este trabajo es la caracterización de los materiales graníticos que constituyen la mayor parte de la fachada principal del edificio, fase previa que permitirá abordar posteriormente las labores de restauración más idóneas.

CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES

En cuanto a las condiciones medioambientales, dada su ubicación en la zona centro de Madrid, se está llevando a cabo el seguimiento de los datos procedentes de 2 estaciones de registro de contaminantes pertenecientes al Departa-

Tabla 1
Propiedades petrofísicas de los granitos

PROPIEDADES	GRANITO A		GRANITO B	
	inalterado	alterado	inalterado	alterado
Densidad real (Kg/m ³)	2.725	2.689	2.684	2.683
Densidad aparente (Kg/m ³)	2.636	2.599	2.547	2.523
Porosidad abierta n ₀ (%)	3.25	3.35	5.13	5.96
% Absorción agua en 48h	1.06(80%)	1.14(82%)	1.48(74%)	2.26(96%)
% Porosidad accesible al Hg	3.75	2.44	3.25	2.72
$\phi < 5\mu$	66%	76%	91%	71%
$\phi < 5\mu$	34%	24%	9%	29%
% Saturación en sorción	1.23	1.29	2.01	2.36
Coeficiente permeabilidad vapor de agua (g/m ² ·24h·mmHg)	0.48	—	0.64	—
Coeficiente capilar (Kg/m ² ·h)	0.61	—	1.60	—
V.Ultrasonidos (m/s)	2798	2627	1588	1126
Módulo Young Dinámico (MPa)	23009	20932	7198	3503
Absorción agua (pipeta) (ml)	1.53	1.02	3.20	—

Tabla 2
Parámetros cromáticos de los granitos

COLOR	L*	a*	b*	IB	IA
Granito "A"	69.86	0.08	3.61	29.22	7.11
Granito "B"	68.21	0.62	6.34	19.06	12.64

L*: luminosidad; a*: tono rojo; b*: tono amarillo; IB: índice de Blanco; IA: índice de Amarillo

Tabla 3
Análisis químicos de muestras de granito del monumento y de referencia

	Muestras Monumento				Muestras de Referencia			
	costra (1)	A ext. (2)	A Int. (3)	B. int. (4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SiO ₂	54.16	67.61	71.40	68.33	64.30-70.82	67.72-72.39	69.57	70.00
Al ₂ O ₃	13.19	15.64	14.43	16.19	14.40-16.15	13.84-15.54	14.72	14.70
Fe ₂ O ₃	2.64	3.69	2.79	3.19	0.37-0.83	0.36-0.61	0.50	0.63
FeO	—	—	—	—	1.85-4.15	1.81-3.04	2.52	2.07
Mn	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05-0.08	0.05-0.06	0.05	0.04
MgO	0.84	1.25	0.88	1.01	0.47-1.46	0.44-1.12	0.62	1.21
CaO	9.46	1.90	1.70	2.42	1.65-3.52	1.84-2.79	2.47	2.25
Na ₂ O	2.68	3.01	2.81	3.25	2.95-3.23	3.03-3.35	3.30	3.43
K ₂ O	3.05	4.99	4.49	4.23	3.74-5.25	3.75-4.90	3.91	4.00
TiO ₂	0.37	0.50	0.36	0.45	0.32-0.87	0.26-0.54	0.34	0.38
P ₂ O ₅	0.12	0.20	0.14	0.15	0.13-0.29	0.01-0.17	—	0.18
P.F.	9.47	1.02	0.81	1.13	0.48-1.11	0.68-1.44	0.71	0.99

Muestras de monumento: (1) costra de granito; (2) granito A alterado (exterior); (3) granito A inalterado (interior); (4) granito B inalterado (interior)

Muestras de referencia:

(5) Adamellitas biotíticas (tipo Valdemorillo). Variedad equigranular (valores de 8 muestras). Bellido et al, 1991

(6) Adamellitas biotíticas (tipo Valdemorillo). Variedad porfídica (valores de 9 muestras). Bellido et al, 1991

(7) Adamellitas biotíticas (tipo Atalaya Real) (resultado de 1 muestra). Bellido et al, 1991

(8) Media de rocas graníticas del sector oriental del Sistema Central. Aparicio et al, 1983

itdlica: valor inferior al límite de determinación

— valor sin determinar

mento de Contaminación Atmosférica —Área de Medio Ambiente— del Ayuntamiento de Madrid (*Plaza del Carmen y Pº de Pontones*), por ser las más próximas al edificio de estudio aunque distantes de ella la primera 850 m y la segunda 950 m en línea recta; además, la segunda estación, aunque se encuentra en un entorno diferente al del monumento, se ha tenido en cuenta por su situación geográfica (al SW del edificio), y coincidir con la dirección de vientos predominantes, que a su vez coincide con la dirección de la calle Toledo. Los parámetros proporcionados son: Partículas en suspensión, Dióxido de azufre, Monóxido de carbono, Dióxido y Monóxido de nitrógeno, Óxidos de nitrógeno en general, Ozono, y cantidad de lluvia, y los años de registro 1998-1999. En la Figura 1 se muestran los valores medios mensuales de la media de las dos estaciones. En ambas estaciones, y por el tipo de circulación, morfología arquitectónica y urbanística de la Colegiata, predomina la combustión de gasoil, con un gran aporte de Partículas, con gran contenido de óxidos metálicos catalizadores del Dióxido de azufre, para formar ácido sulfúrico, lo que justifica el gran enmugrecimiento y sulfataciones que presenta el Monumento.

Los datos meteorológicos sólo han podido tomarse de la estación de Retiro de Madrid, procedentes del Instituto Nacional de Meteorología. Muy importante para este estudio, son las heladas que se presentan durante ocho meses, con temperaturas medias mínimas de casi -10°C en diciembre, mientras las máximas pueden llegar a 39°C en el mes de agosto, lo cual representa que la oscilación térmica media al año es de 48.2°C registrándose las máximas oscilaciones en el mes de junio con 39.6°C.

METODOLOGÍA

Para la caracterización del material se extrajeron 11 testigos de la terraza principal de la iglesia, representativos de la totalidad del material existente. Sobre este material se ha llevado a cabo el estudio petrográfico y la determinación de sus propiedades petrofísicas: porosidad accesible al agua, densidad aparente y real, cinética de sorción y desorción de agua, saturación de agua, capilaridad, absorción de agua mediante tubo de Karsten (*pipeta*), permeabilidad al vapor de agua, distribución porosimétrica, parámetros cromáticos y velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas. Los ensayos se han efectuado siguiendo las recomendaciones NORMAL (CNR-ICR, 1981) y las recomendaciones de la RILEM P-25 (1980). Dada la imposibilidad de realizar el ensayo de capilaridad normalizado, se ha efectuado con probetas cilíndricas en las que no se ha impermeabilizado la altura, por lo que este valor ha de considerarse comparativo entre los dos granitos y no como valor real.

Se han diferenciado dos tipos de granitos en función de sus diferentes propiedades y estado de conservación. Para la caracterización de los materiales se han utilizado los

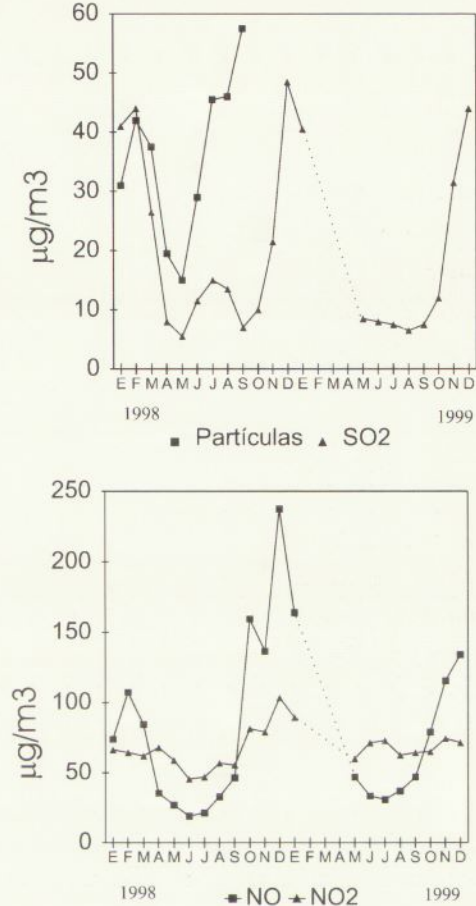


FIGURA 1: Curvas de registro de contaminantes atmosféricos.

valores de las propiedades determinadas en las partes interiores de los testigos, consideradas estas zonas como las menos alteradas. Cuando ha sido posible, debido al estado del material, se han realizado también los ensayos sobre las partes externas o más alteradas, con objeto de poder establecer el grado de alteración de los materiales. Además, se han realizado análisis químicos en los granitos y el estudio de las costras negras mediante microscopía electrónica de barrido junto con microanálisis EDX, y análisis químico.

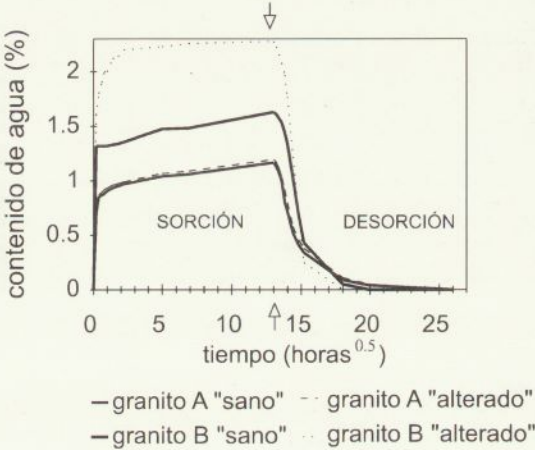


FIGURA 2: Cinética de sorción-desorción de agua de los granitos.

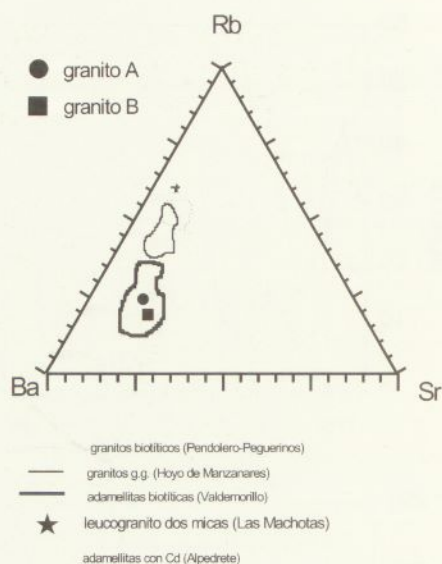


FIGURA 3: Representación de los granitos de la Colegiata en el diagrama Rb-Sr-Ba (El Bouseily y El Sokkary, 1975).

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANÍTICO

Petrográficamente se trata de rocas holocristalinas con cristales de tamaño heterogéneo, de grano medio, subeudrales o hipidiomorfos. La roca de construcción puede clasificarse como una adamellita biotítica de grano medio. El mineral fundamental es el feldespato potásico tipo ortosa (35-65%) seguidos de cuarzo (25%), plagioclasas —alcalinas— y biotitas. Como componentes secundarios, además de clorita y moscovita, hay epidota, illita, prehnita, sericita, y como accesorios se presenta la ilmenita, circón, apatito, etc. Existen enclaves microgranudos máficos (*gabarros*), de composición tonalítica formados por cuarzo, plagioclasas, biotita, anfíbol, etc. La porosidad es fisural, inter e intracristalina. El estudio petrográfico permite definir a la roca como una adamellita biotítica de grano medio del tipo Valdemorillo (Bellido *et al.*, 1991), perteneciente a los granitoides hercínicos del sector centrooriental del Sistema Central, muy abundante en esta localidad, más o menos próximas a otras formaciones análogas con distintos tamaños de cristal, incluso en transición a adamellitas porfídicas. Esto justifica las variaciones composicionales de las distintas épocas de construcción de la Colegiata, puestas de manifiesto también por el número y tamaño de los enclaves principalmente, casi ausentes en la primera fase de construcción, más abundantes en las torres, y de menor tamaño en las reconstrucciones tardías. La mayoría de las canteras de explotación de este tipo de granitos están actualmente inactivas, aunque todavía pueden encontrarse algunas activas que pudieran proporcionar material de sustitución al monumento.

Atendiendo a las características petrofísicas determinadas (Tabla 1), se pueden diferenciar dos tipos de granitos originales. El más abundante en la construcción (A) pre-

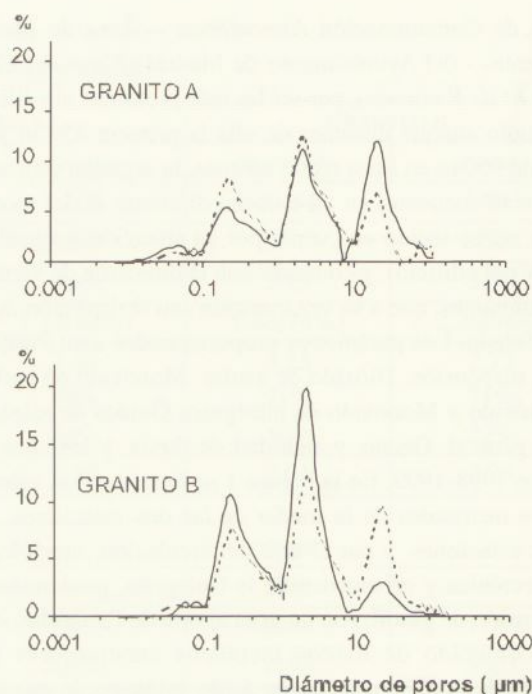


FIGURA 4: Distribución porométrica de los granitos. Línea continua: granito inalterado. Línea discontinua: granito alterado.

senta un estado de conservación muy aceptable con una velocidad de propagación de ultrasonidos próximo a 2.800 m/s, y una capacidad de absorción de agua del 1.23%. En estos granitos no se aprecian variaciones importantes entre las zonas internas y externas, aunque en las primeras existe una disminución de la velocidad de propagación de ultrasonidos y un ligero aumento de la porosidad accesible al agua. La otra variedad petrológica (B), presenta un peor comportamiento mecánico con una velocidad de ultrasonidos de 1.588 m/s, aunque en zonas internas puede alcanzar valores inferiores a 1.126 m/s. También estos granitos tienen un peor comportamiento ante el agua. La porosidad accesible al agua es más alta, con valores de 5.13%; en ellos, el proceso de degradación es más elevado, con aumento de la porosidad abierta, en zonas externas, y una mayor cinemática de sorción y desorción de agua (Fig. 2). Estos granitos presentan un mayor proceso de arenización en superficie.

También quedan diferenciados en la medida de sus parámetros cromáticos, fundamentalmente en los Índices de Blanco y de Amarillo (Tabla 2). El análisis químico de los dos tipos de granito pone de manifiesto un mayor contenido de SiO_2 para el granito A (71.40%) respecto al B (68.33%), y un contenido menor en general del resto de los compuestos (Tabla 3). En dicha tabla se presentan también los análisis químicos de muestras de adamellitas biotíticas tipo Valdemorillo y tipo Atalaya Real, verificando que los valores determinados para las muestras de la Colegiata se encuentran dentro de los límites determinadas para los granitos de Valdemorillo, a excepción del Fe,

cuyo contenido es bastante mayor en las muestras del monumento. En la representación de los granitos de la Colegiata, en el diagrama Rb-Sr-Ba utilizado por El Bouseily y El Sokkary (1975) (Bellido *et al.*, 1991), los dos puntos representados correspondientes a granito A y B, coinciden con las adamellitas biotíticas de Valdemorillo equigranulares (Fig. 3). En cuanto a la distribución del tamaño de poros (Fig. 4), ambos materiales presentan curvas polimodales (0.2, 2 y 20 μ de diámetro), típicas de los materiales graníticos, en las cuales lo que varía es la proporción de poros de cada tamaño; así, el granito A, con una porosidad accesible al mercurio de 3.75%, tiene una proporción de microporos ($\phi < 5\mu$) del 66%, menor que el 91% del granito B, con una porosidad accesible al mercurio de 3.25%. La representación de las curvas de distribución porosimétrica apuntan a que, los dos tipos de granito tienden a igualarse cuando se alteran.

El estudio de las costras negras mediante MEB+EDX (Fig. 5), revela que la costra negra está muy desarrollada en zonas verticales y protegidas, como puede ser en la zona de balaustres, en donde presenta fenómenos de yesificación muy importantes (prácticamente todo es yeso, observándose escasas partículas contaminantes, de forma esférica y compuestas principalmente por carbono). En cambio, en zonas horizontales (remate de la balaustrada), la costra negra, como es lógico, está menos desarrollada (abundan las partículas esféricas de color blanquecino granuladas compuestas fundamentalmente por Ca, Si, O y C, y también el otro tipo de partículas (esféricas y subesféricas) a base de C), y lo que se observa son fenómenos de alteración del granito (micas muy alteradas). El análisis químico de la costra determina una disminución en el contenido de SiO_2 y Al_2O_3 respecto al granito y una cantidad considerable de sulfatos ($S_{\text{total}}=3.91\%$).

Respecto a las pautas de alteración de los granitos, los datos permiten establecer que el granito de tipo "A" se altera menos que el granito "B", ya que en este último los valores de las propiedades determinadas en zonas sanas o inalteradas y zonas alteradas varían mucho más que para el granito "A". Químicamente, la alteración del granito A conlleva una disminución del contenido en sílice, y un aumento en general del resto de los óxidos determinados, señalando el del Fe, Mg, Ca y Na.

CONCLUSIONES

Los granitoides de la Colegiata de San Isidro son adamellitas biotíticas de textura de grano medio procedentes de las canteras de la zona de Valdemorillo (Madrid). Las patologías de degradación que presenta este granito son: enmugrecimiento favorecido por la contaminación atmosférica del entorno, y la arenización, junto con descamaciones y desplazados, así como pérdida de material por fisuraciones. Sobre estos granitos se han desarrollado costras negras de naturaleza yesífera.



FIGURA 5: Imagen al microscopio electrónico de barrido (MEB) de la costra negra.

De las dos variedades petrológicas definidas, la más abundante (granito A) presenta una resistencia a la degradación más alta, no observando variaciones importantes entre la zona interna y externa. Por el contrario, existen sillares labrados con un granito de peor calidad (granito B), que presenta un grado de arenización más alto. El estado de alteración general de estos granitos originales estudiados, obligaría a realizar labores de consolidación en las zonas con procesos de arenización, y trabajos de protección en toda la superficie pétrea, con objeto de disminuir el proceso de degradación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad de Madrid a través del proyecto 06/0108/98 y al disfrute de una beca postdoctoral concedida por dicho organismo (02/0280/1998) (Orden 2024 bis/1999, BOCM 15-9-99).

REFERENCIAS

- Aparicio, A., Bellido, F., Brandle, J.L., García, L. y Santos, V. (1983): Caracterización de los granitoides hercínicos del sector centrooriental del Sistema Central Español. *Est. Geol* 39: 271-306.
- Barroso, J. (1939, ..., 1953): Proyecto de reconstrucción de la Santa Iglesia Catedral de San Isidro el Real de Madrid. Ministerio de la Gobernación, Dirección General de Regiones Devastadas y Reparaciones. (Archivo General de la Administración).
- Barroso, J. (1942): La Catedral de San Isidro. Reconstrucción, III, 25: 289-298.

- Bellido et al. (1991): Mapa Geológico de España (2ª serie), 1:50.000, hoja nº 533, San Lorenzo de El Escorial, ITGE, Madrid.
- C.N.R.-I.C.R. Raccomandazioni NORMAL: 7/81 (1981): Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione. 11/85 (1985): Assorbimento d'acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare. 21/85 (1985): Permeabilità al vapor d'acqua.
- De Reina, D. (1947): San Isidro el Real, vieja catedral de Madrid. *Reconstrucción*, VIII, 74: 235-242.
- El Bouseily, A.M. y El Sokkary (1975): The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. *Chemical Geology* 16: 207-219.
- Espinós Molto, V. (1927): San Isidro el Real. Apuntes de la historia y vicisitudes de este templo madrileño, con noticia inédita de sucesos y personas con él relacionados. *Revista de la Biblioteca, Archivo y Museo. Ayuntamiento de Madrid*, XVI: 454-476.
- R.I.L.E.M. (1980): Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Commission 25 PEM. Materials and Structures* 75: 175-253.